

ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ У ВАКУУМІ. ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА

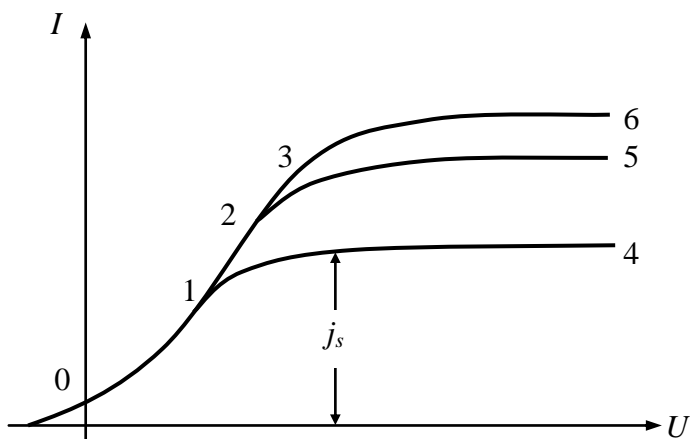
Обладнання

1. Мікроамперметр;
2. Міліамперметр;
3. Вольтметр цифровий Щ4313;
4. Джерело напруги;
5. Випрямляч для живлення нитки розжарення діода 1Ц11П.

Теоретичні відомості

Якщо в електричному колі є частина вакууму, то в такому електричному колі електричний струм не протікатиме. У частині кола, де є вакуум, відсутні носії електричного заряду. Вакуум є найкращий ізолятор. Якщо в посудині, в якій створено вакуум, закріпити два електроди й до одного з них (анод) прикласти позитивний потенціал, а до другого, який розжарити (катод), – від’ємний, то в електричному колі з таким пристроєм протікатиме електричний струм.

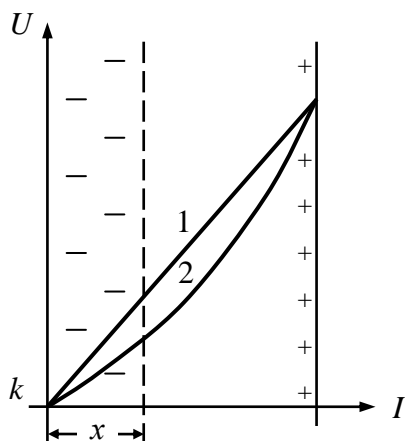
Такий пристрій називають вакуумним діодом (двоелектродна лампа). Причиною появи струму через вакуумний діод є термоелектронна емісія.



Мал. 11.1

Явище термоелектронної емісії полягає у випромінюванні електронів розжареними металами. Вакуумний діод має односторонню провідність. Сила термоелектронного струму в діоді залежить від потенціалу анода відносно катода. Крива, що зображує залежність сили струму в діоді від анодної напруги, називається вольтамперною характеристикою (мал. 11.1). Коли потенціал анода дорівнює нулю, сила струму через діод досить мала. При збільшенні позитивного потенціалу анода сила струму зростає згідно з кривою 01.

При подальшому зростанні позитивного потенціалу анода сила струму зростає і сягає деякого максимального значення j_s , який називається струмом насичення діода і майже перестає залежати від анодної напруги (ділянка характеристики 14).



Мал. 11.2

При збільшенні температури катода характеристика зображається кривими 0125, 01236 і т.д.

При силах струму, що менші від j_s , залежність сили струму від напруги при всіх температурах зображається однією і тією самою кривою 0123. Різними при різних температурах виявляються значення струму насичення j_s , які швидко збільшуються при зростанні температури катода. При цьому збільшується і та анода напруга U_c , за якої встановлюється струм насичення.

Бачимо, що вольтамперна характеристика електронної лампи виявляється нелінійною, а отже,

електронна лампа – діод, який являє собою приклад провідника, що не підкоряється закону Ома.

Залежність струму діода від напруги має просте пояснення. За наявності термоелектронної емісії у просторі між катодом і анодом в будь-який момент часу знаходяться електрони, що рухаються від катода до анода і створюють хмару від'ємного заряду (просторовий заряд), який змінює розподіл потенціалу в діоді. Якщо катод і анод – плоскопаралельні пластинки, то за відсутності просторового заряду (при холодному катоді) розподіл потенціалу між катодом і анодом (утворюють плоский конденсатор) зображається прямою лінією 1 (мал. 11.2). За наявності просторового заряду (від'ємний заряд), розподіл потенціалу змінюється і виражається кривою 2. При цьому значення потенціалу в будь-якій площині X виявляється меншим, ніж за відсутності просторового заряду, а отже, і швидкості руху електронів за відсутності просторового заряду зменшується. При збільшенні анодної напруги концентрація електронів у хмарі просторового заряду стає меншою, і анодний струм збільшується (з підручника С.Г. Калашнікова “Електрика”, §170).

Російський фізик Богуславський С.А. (1883-1923) і незалежно від нього американський фізик і хімік Ленгмюр (1881-1957) показали, що коли анодний струм далекий від насичення, його залежність від анодної напруги U_a аналітично виражаються формулою $I_a = \alpha U_a^{3/2}$. Цю формулу називають формулою Богуславського-Ленгмюра або “Законом 3/2”. Коефіцієнт α залежить від формули і розмірів електродів. У випадку, коли

електроди являють собою плоскопаралельні пластини, $\alpha = \frac{4}{9} \frac{\epsilon_0 s}{d^2} \sqrt{2 \frac{l}{m}}$. Струм емісії

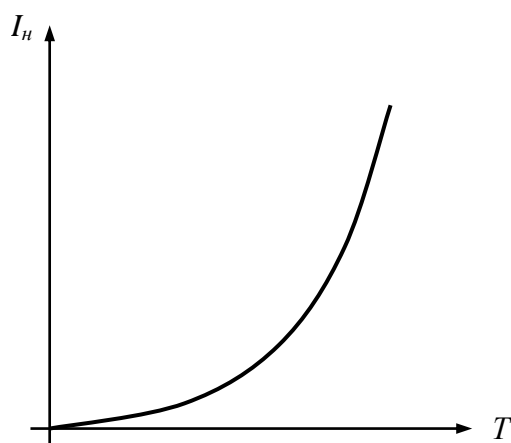
катода залежить від його температури та роботи виходу електрона з металу катода.

Явище термоелектричної емісії вивчив Оуен Річардсон (1879-1959), який за це в 1928 р. одержав Нобелівську премію. Виходячи з класичних уявлень Річардсон дістав формулу, яка носить його ім'я:

$$j_n = A \sqrt{T} e^{-\frac{e\phi_i}{kT}},$$

де A позначено вираз $A = ne \sqrt{\frac{k}{2\pi m}}$. Тут l, m, n – відповідно заряд, маса та концентрація

електронів провідності в металах; k – стала Больцмана. Отже, за класичною електронною теорією коефіцієнт A повинен залежати від концентрації електронів провідності n і для різних металів має бути не однаковим. Графічно залежність струму насичення від температури показано на мал. 11.3.



Мал. 11.3

Розглядаючи явище термоелектронної емісії за квантовою теорією провідності твердих тіл, Дешмен вивів іншу формулу, яку називають формулою Річардсона-Дешмена:

$$j_n = BT^2 e^{-\frac{e\phi_i}{kT}}.$$

Обидві формули (класична і квантово-механічна) правильно передають експоненціальну залежність густини струму насичення від температури. Множники $T^{1/2}$ і T^2 відіграють другорядну роль, оскільки показникова функція (однакова в обох формулах) змінюється значно сильніше за степеневу у формулі Річардсона-Дешмена B позначено вираз

$B = \frac{4\pi emk^2}{h^3}$, де h – стала Планка. Отже, за квантовою теорією константа B не залежить від індивідуальних характеристик металу і для всіх металів має бути однаковою, а саме:

$$B = 1,2 \cdot 10^6 \frac{A}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^2} = 120 \frac{A}{\text{см} \cdot \text{К}^2}.$$

Але в жодному металі не виявлено такого значення константи B . Наприклад, експериментальне значення коефіцієнта B для різних технічних металів становить: вольфрам – $0,6 \cdot 10^6$; торій – $0,7 \cdot 10^6$; вольфрам, вкритий тонкою (моноатомною) плівкою торію (торійований вольфрамовий катод) – $0,03 \cdot 10^6$. Розходження пояснюється тим, що в теоретичних розрахунках не враховано вплив домішок на коефіцієнт B , які суттєво спотворюють результати розрахунків, а також залежність роботи виходу електронів від температури та інші фактори.

Для температур T_1 і T_2 густини струмів насичення за формулою Річардсона-Дешмена: $j_{n1} = BT_1^2 e^{-\frac{A}{kT_1}}$; $j_{n2} = BT_2^2 e^{-\frac{A}{kT_2}}$. Відношення сил струмів насичення рівне

відношенню густин цих струмів $\frac{I_{n2}}{I_{n1}} = \frac{j_{n2}}{j_{n1}} = \frac{BT_2^2 e^{-\frac{A}{kT_2}}}{BT_1^2 e^{-\frac{A}{kT_1}}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 e^{\frac{A}{k} \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}}$. Розв'язуючи

відносно A , дістанемо $A = k \cdot \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{j_{n2} T_1^2}{j_{n1} T_2^2}$.

Виконання вимірювань

Завдання І: Дослідити залежність струму насичення діода від температури катода та визначити роботу виходу електрона.

1. Скласти вимірювальну установку. Клеми «6,3 В» випрямляча для живлення нитки розжарення діода 1Ц11П приєднати до відповідних клем джерела напруги. До клем випрямляча «V» приєднати цифровий вольтметр, а до клем «А» амперметр класу точності не нижче 0,2. Клеми «К» приєднати до клем «-» випрямляча. Клеми «+А» через міліамперметр приєднати до клем «+» випрямляча.

2. На випрямляча для живлення нитки розжарення діода 1Ц11П послідовно встановлювати силу струму нитки розжарення катода I_k з таблиці № 1 і вимірювати значення катодної напруги U_k і сили струму насичення I_n .

3. За законом Ома для ділянки кола визначити опір нитки розжарення R_k .

4. Температуру катода визначити через визначення опору нитки розжарення виходячи з формули $R_t = R_0(1 + \alpha t)$. Опір нитки розжарення діода 1Ц11П при 0°C складає 1 Ом, температурний коефіцієнт опору вольфраму $\alpha = 5 \cdot 10^{-3} \text{C}^{-1}$.

5. Результати вимірювань і обчислень занести до таблиці № 11.1.

Таблиця № 11.1

№	Сила струму нитки розжарення катода I_k , мА	Напруга на нитці розжарення U_k , В	Опір нитки розжарення R_k , Ом	Температура катода $t = \frac{R_t - R_0}{\alpha R_0}$		Сила струму насичення I_n , мкА	Примітка
				t , $^\circ\text{C}$	T , К		
1.	100						діапазон 10 мкА

2.	110						діапазон 25 мкА
3.	120						діапазон 100 мкА
4.	130						діапазон 250 мкА
5.	140						діапазон 500 мкА

6. На основі одержаних даних побудувати графік залежності струму насичення вакуумного діода від температури катода.

7. Обчислити роботу виходу електрона для T_1 та T_2 , T_2 та T_3 , T_3 та T_4 і T_4 та T_5 значень температури катода. Знайти середнє значення A .

Завдання II: Дослідити вольт-амперної характеристики вакуумного діода при двох різних температурах, вказаних викладачем.

1. Для заданого значення температури катода зняти вольт-амперну характеристику. Кожну вольт-амперну характеристику знімати при сталій температурі. Для цього треба встановити відповідну температурі силу струму та стежити за її сталістю.

2. На джерелі послідовно встановлювати значення анодної напруги діода U_a з таблиці № 2 і вимірювати силу анодного струму I_a .

3. Результати вимірювань записати до таблиці № 11.2.

4. Повторити пункти 1-3 для другого значення температури.

Таблиця № 11.2

Температура катода T , К	Напруга на аноді діода U_a , В	5	10	15	20	25	30	40	50	100
$T_1 = \underline{\hspace{2cm}}$	Сила анодного струму I_{a1} , мА									
$T_2 = \underline{\hspace{2cm}}$	Сила анодного струму I_{a2} , мА									

5. На основі одержаних даних побудувати вольт-амперну характеристику вакуумного діода при двох різних температурах.

6. Зробити висновки.

Контрольні питання

1. Пояснити будову і принцип роботи вакуумного діода.
2. Пояснити явище термоелектронної емісії.
3. Чому при збільшенні анодної напруги сила струму, що протікає через вакуумний діод досягає деякого максимального значення?
4. Записати і пояснити закон Богуславського-Ленгмюра.
5. Виразити густину струму насичення, як функцію від температури.

Рекомендована література

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики у 3 т.: Навч. посіб. – К.: Техніка, 2001. – Т.2. Електрика і магнетизм. – С. 198–211.
2. Цілінко М. Г. Саморобні електронні прилади в лабораторному практикумі з електрики і магнетизму: Навч. посіб. – К.: ІСДО, 1995. – С. 87–94.
3. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 1977. – С. 364-368.

Висновки
